

Schallquellenortung mit der Zylindrischen Nahfeld-Holographie

André Gerlach, Peter Kuhn und Hans-Peter Grabsch
Robert Bosch GmbH, Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung,
Abteilung Angewandte Physik (FV/FLP), D-70839 Gerlingen

1 Einleitung

Für Aufgaben der Lärminderung und der Geräuschgestaltung sind in einer ersten Bestandsaufnahme oft die Teilschallquellen des untersuchten Objektes zu ermitteln. Für eine solche Schallquellenortung im Luftschallfeld gibt es verschiedene, bereits erprobte Verfahren, angefangen vom "Überstreichen" mit einer Schallintensitätssonde bis hin zu einer Schallfeldkartierung (Schalldruck oder Schallintensität).

Bei korrelierten Teilschallquellen entsteht durch Superposition ein Interferenzbild, das bei diesen Verfahren eine geometrische Zuordnung von Teilschallquellen schwierig macht. Abhilfe schafft die Planare Nahfeld-Holographie, bei der auf einer Ebene der Schalldruck gemessen und auf einer anderen Ebene unmittelbar vor der zu untersuchenden Quelle berechnet werden kann. Die Planare Nahfeld-Holographie ist ein in der Praxis etabliertes und kommerziell verfügbares Werkzeug, das z. B. für Messungen am Motorraum angewandt wird. Für kleinere kompakte Produkte ist jedoch eine Methode erforderlich, die die Schallabstrahlung in alle Richtungen ermittelt. Dieser Anforderung wird die Zylindrische Nahfeld-Holographie besser gerecht, bei der auf einer Zylinderschale das Schallfeld gemessen und auf einer anderen berechnet werden kann. Da es dazu kein kommerzielles Programm gibt, wurde die diesbezügliche Literatur ausgewertet, um eigene Untersuchungen ergänzt und darauf aufbauend die Methode in einem Programm (Matlab) umgesetzt.

In diesem Beitrag stellen wir den rechnerischen und messtechnischen Einsatz der Zylindrischen Nahfeld-Holographie vor. Am Beispiel einer Quelle mit bekannter Anordnung der Teilschallquellen zeigen wir, wie sich durch Berechnung des Schallfeldes auf einer oberflächennahen Zylinderschale die Ortbarkeit der Schallquellen gegenüber einer Schallfeldkartierung im größeren Abstand verbessert.

2 Theorie der Zylindrischen Nahfeld-Holographie

Zur Theorie der Akustischen Nahfeld-Holographie gibt es einen umfangreichen Literaturbestand.^{1 2 3 4 5 6}

Die Akustische Nahfeld-Holographie in Zylinderkoordinaten zielt auf die Berechnung von Schalldruckwerten auf einem Zylindermantel mit Radius r_B ausgehend von Schalldrücken gemessen auf einem Zylindermantel mit dem Radius r_M . Für Aufgaben der Schallquellenortung interessiert insbesondere das „inverse externe Problem“.¹ Bei diesem befindet sich die Schallquelle innerhalb der Zylindermäntel und es gilt $r_M > r_B$.

Zur Durchführung der Zylindrischen Nahfeld-Holographie wird der Schalldruck auf dem Ausgangs-Zylindermantel bezüglich der Umfangs- und axialen Richtung Fourier-transformiert und dann mit der Ausbreitungsfunktion $H_n^{(1)}(k_r r_B) / H_n^{(1)}(k_r r_M)$ multipliziert (Separation in Zylinderkoordinaten⁷). Dabei ist $H_n^{(1)}$ die Hankel-Funktion der ersten Art n -ter Ordnung, k_r die Wellenzahl in radialer Richtung und r_M bzw. r_B der Radius der Mantelfläche, auf der der Schalldruck gemessen bzw. berechnet wird. Nach inverser

Fourier-Transformation liegt der Schalldruck in Betrag und Phase auf dem Zylindermantel r_B vor:

$$p(r_B, \varphi, z) = F_z^{-1} F_\varphi^{-1} \left\{ \frac{H_n^{(1)}(k_r r_B)}{H_n^{(1)}(k_r r_M)} F_z F_\varphi [p(r_M, \varphi, z)] \right\}. \quad (1)$$

Diese Zylindrische Schallfeldtransformation ist bis dahin noch exakt. Abweichungen entstehen insbesondere durch die endliche Länge des Zylindermantels, den Übergang der kontinuierlichen Verteilung zu an diskreten Orten vorliegenden Schalldrücken, Abweichungen von der Freifeldbedingung sowie durch Rauschen von Messsystem, Fremdschall und Rechenungenauigkeit.

3 Rechnerische Validierung der Methode

Für eine rechnerische Überprüfung der Zylindrischen Nahfeld-Holographie wurde auf einem Zylindermantel ($r_B = 0,15$ m) ein Modellproblem definiert, siehe Abbildung 1. Das Problem enthält mehrere Quellen, die bei 1000 Hz mit unterschiedlichen Schalldrücken (normierte Effektivwerte 1 / 0,5 / 0,25) z. T. gegenphasig arbeiten.

Wir berechnen das Schallfeld auf einem Zylindermantel mit dem Radius $r_M = 0,2$ m (direktes Problem, exakt) und fügen additiv 0,5 % „Mess“-Rauschen hinzu. Diese Schalldruckwerte werden auf den Radius $r_B = 0,15$ m zurücktransformiert, siehe Abbildung 2. Die schlechte Qualität der Schallfeldrekonstruktion zeigt, dass für die Transformation zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind. Untersucht wurden im einzelnen:⁷

- Methoden bezüglich der Diskretisierung
 - Interpolation (zusätzliche Stützstellen)
 - Zero-padding / Extrapolation (Vergrößerung in z -Richtung)
- Filterung im Wellenzahl-Bereich
 - Elliptisches Exponentialfilter (Wellenzahl-Grenzen in z - und Umfangsrichtung verschieden)
 - Wiener Filter

Die beste Schallfeldrekonstruktion wurde durch eine Kombination von Interpolation, Extrapolation und elliptischer Exponentialfilterung erreicht, siehe Abbildung 3. Die Rekonstruktion der Phasen des Schalldruckes ist vergleichbar gut, aus Platzgründen wird auf eine Darstellung verzichtet. Die Grenzen, bis zu denen die Wellenzahlen bei der Transformation berücksichtigt wurden, sind:⁷

$$\text{Axialrichtung: } k_c = \sqrt{\frac{D^2 + (20 k (r_B - r_M) \log_{10}(e) \text{ dB})^2}{(20 (r_B - r_M) \log_{10}(e) \text{ dB})^2}}, \quad (2)$$

$$\text{Umfangsrichtung: } n_c = \text{Int} \left[\frac{-D}{20 \log_{10}(r_M r_B^{-1}) \text{ dB}} + 0,5 \right], \quad (3)$$

wobei k die „Gesamt“-Wellenzahl ($k^2 = k_z^2 + k_r^2$, $k = 2\pi f / c$, Frequenz f und Schallgeschwindigkeit c), D die Dynamik der vorliegenden Daten (in dB, Messsystem und Hintergrundgeräusch) ist und $\text{Int}[\]$ für Integer steht.

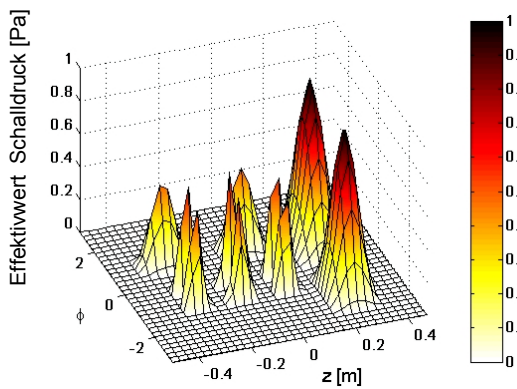


Abbildung 1: Modellproblem, abgewickelter Zylindermantel: axiale Koordinate z und Umfangswinkel Φ

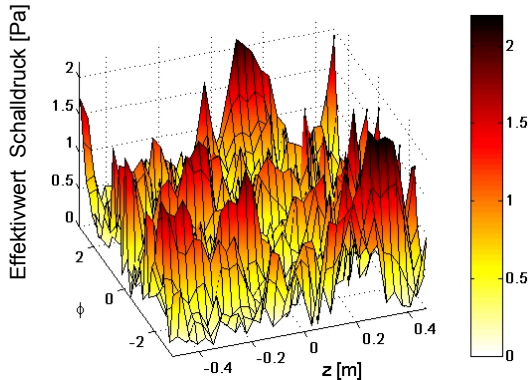


Abbildung 2: Schallfeldrekonstruktion, ungefiltert

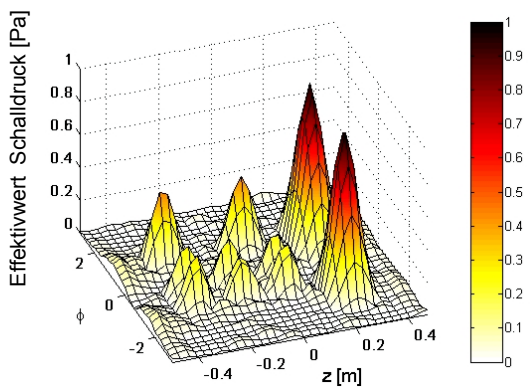


Abbildung 3: Schallfeldrekonstruktion, Elliptisches Filter

4 Messtechnische Validierung - Schallquellenortung

Für eine messtechnische Überprüfung des Algorithmus verwenden wir einen starren zylindrischen Körper (Zylinder Länge 0,6 m, Radius 0,09 m) mit 3 eingebauten Lautsprechern. Zwei benachbarte Lautsprecher arbeiten bei 300 Hz gleichphasig und zum dritten gegenphasig. Auf einem Zylindermantel (Länge $z = \pm 0,4$ m, $r_M = 0,14$ m) wurden Schalldrücke mit einer axialen Teilung von 32 Positionen und einer Umfangsteilung von 20° gemessen.

Die auf der Messfläche im Abstand von 0,05 m zur Schallquelle ($r_M = 0,14$ m) ermittelten Schalldrücke sind nach Betrag und Phase in Abbildung 4 dargestellt. Das Ergebnis der Berechnung der Schalldrücke auf einer Fläche unmittelbar vor der Schallquelle ($r_B = 0,09$ m) zeigt Abbildung 5. Vergleicht man die Darstellungen des Effektivwertes des Schalldruckes, so ist die deutlich verbesserte Ortbarkeit der Schallquellen auf der Fläche unmittelbar vor der Quelle zu erkennen. Zusammen mit den gemessenen Phasen kann man sicher auf den Ort und die Phasenbeziehung der Teilschallquellen schließen. Dieser Effekt belegt die eingangs beschriebene

Verbesserung, die die Nahfeld-Holographie durch Berechnung auf einer quellnahen Fläche im Vergleich zu einer einfachen Schallfeldkartierung in größerer Entfernung leistet. Bedenkt man, dass die Messung mit 0,05 m Abstand schon „recht nahe“ am Objekt erfolgte, ist die verbesserte Ortbarkeit bemerkenswert.

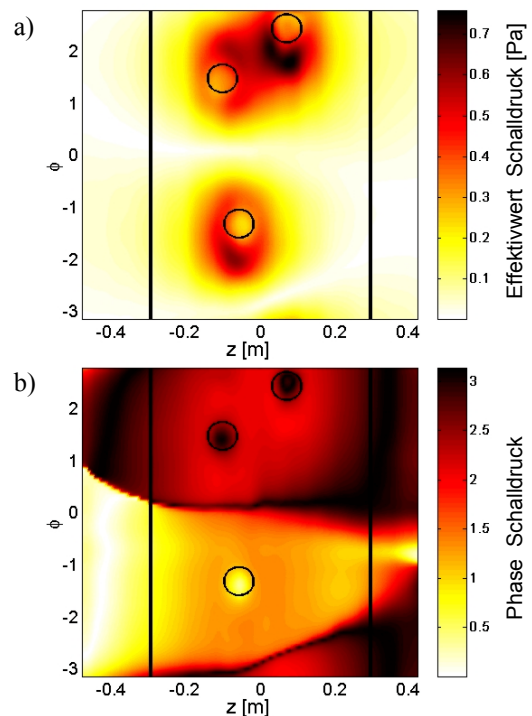


Abbildung 4: Gemessene Schalldrücke bei $r_M = 0,14$ m in a) Betrag und b) Phase

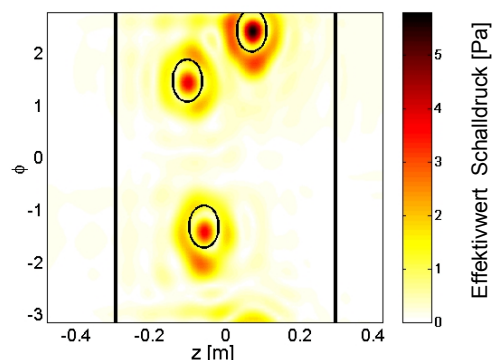


Abbildung 5: Berechneter Schalldruck an der Schallquellenoberfläche $r_B = 0,09$ m, Orte der Lautsprecher eingezeichnet

- ¹ Williams, Earl G.: Fourier Acoustics - Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography. (Academic Press, San Diego, 1999)
- ² Maynard, J. D. ; Williams, E. G. ; Lee, Y.: Nearfield acoustic holography. I. Theory of generalized holography and the development of NAH. Journal of the Acoustical Society of America JASA, **78**, 1395 – 1413 (1985)
- ³ Fleischer, H. ; Axelrad, V.: Fourier-Akustik: Ein Verfahren zur Schallfeldanalyse. Acustica, **57**, 51 – 61 (1985)
- ⁴ Möser, M.: Ein Beitrag zur Schallquellenrekonstruktion durch akustische Kurzwellen-Holographie. Acustica, **61**, 288 – 300 (1986)
- ⁵ Reibold, R.: Sound source reconstruction using Fourier optics. Acustica, **63**, 61 – 64 (1987)
- ⁶ Hald, Jørgen: STSF - a unique technique for scan-based Near-field Acoustic Holography without restrictions on coherence. Brüel & Kjær Technical Review (1989), No. 1, 1 – 50
- ⁷ Kuhn, Peter: Development of Algorithms for Nearfield Acoustical Holography in Cylindrical Coordinates. Report. Robert Bosch GmbH (2001)